

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

**ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ
МІСЬКОГО ГОПОДАРСТВА**



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до

РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

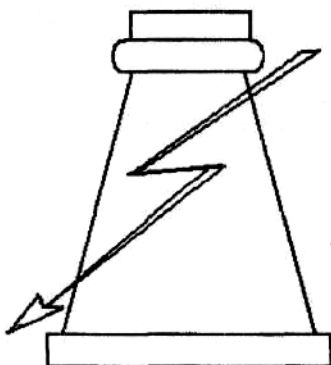
з курсів

«ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ»

та

«ТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА ВИСОКОЇ НАПРУГИ»

*(для студентів 4-5 курсів заочної форми навчання
за напрямом підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології»
та слухачів другої вищої освіти зі спеціальності 7.090603(7.05070103)
«Електротехнічні системи електроспоживання»)*



Харків – ХНАМГ – 2011

Методичні вказівки до розрахунково-графічної роботи з курсів «Техніка високих напруг» та «Техніка та електрофізика високої напруги» (для студентів 4-5 курсів заочної форми навчання за напрямом підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» та слухачів другої вищої освіти зі спеціальності 7.090603 (7.05070103) «Електротехнічні системи електроспоживання») / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: В. Ф. Рой. – Х.: ХНАМГ, 2011. – 38 с.

Укладач: д.т.н. В. Ф. Рой

Рецензент: к.т.н. І. Г. Абраменко

Рекомендовано кафедрою ЕМ,
протокол № 5 від 27.12.2010 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. Захист підстанції від прямих ударів блискавки.....	6
2. Розрахунок зони захисту підстанції	8
2.1. Розрахунок зони захисту одиночного блискавковідводу	9
2.2. Розрахунок зони захисту подвійного блискавковідводу	10
2.3. Розрахунок зони захисту різновисотного блискавковідводу	12
2.4. Розрахунок зони захисту тросового блискавковідводу	14
2.5. Розрахунок відстані блискавковідводу до захищаного об'єкта	16
3. Розрахунок грозозахисного заземлення.....	17
3.1. Приклад розрахунку заземлення 1	21
3.2. Приклад розрахунку заземлення 2	22
4. Захист ПС від імпульсів набігаючих перенапруг	24
4.1. Внутрішні перенапруги	24
4.2. Грозові перенапруги	25
4.3. Схема заміщення для хвильових процесів	27
4.4. Приклад розрахунку захищеного підходу до ПС	31
Варіанти завдань до розрахунково-графічної роботи.....	37
Список джерел	38

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- ДЖ—джерело живлення
- ГПП—головна понижуюча підстанція
- ТП—трансформаторна підстанція
- ПЛ—повітряна лінія електропередачі
- ПС—підстанція
- ВН—висока напруга
- НН— низька напруга
- ВРП— відкритий розподільчий пристрій
- КРП— комплектний розподільчий пристрій
- РУ— розподільчий пристрій
- КЗ— коротке замикання
- СКЗ—струм короткого замикання
- ТВП— трансформатор власних потреб
- ТН— трансформатор напруг
- ТС— трансформатор струму
- ШНВФ— шкідливі і небезпечні виробничі фактори
- ЕРС— електрорушійна сила
- БСК— батарея статичних конденсаторів
- РПН— пристрій регулювання напруги під навантаженням
- ЛЕП— лінії електропередач
- ПУБ – прямий удар блискавки

Вступ

Дисципліна «Техніка та електрофізика високої напруги» і «Техніка високих напруг» вивчає основні положення щодо організації, постановки та проведення наукових досліджень в галузі електроенергетики. Особлива увага приділяється розвитку творчих навичок у майбутніх спеціалістів, що сприятимуть формуванню у студентів самостійності і творчої активності у вирішенні конкретних завдань на основі останніх досягнень науки і техніки. Складні проблеми, що виникають в сучасній електроенергетиці, потребують від спеціаліста творчого підходу, навичок дослідника. Тому сучасний спеціаліст повинен володіти не тільки фундаментальними знаннями в галузі електроенергетики, але і навичками творчого підходу до вирішення практичних питань, вмінням використовувати все нове, що з'являється в науці та практиці.

Дана робота присвячена дослідженню взаємного зв'язку між електричними властивостями основних видів ізоляції, діючих перенапруг і характеристиками захисної апаратури, а також вимогам до ізоляційно-конструкційних установок високої напруги. Вона пропонує методику визначення електричної міцності простих ізоляційних конструкцій при дії на ізоляцію грозових і внутрішніх перенапруг, а також надає необхідну інформацію про процеси, які призводять до погіршення характеристик ізоляції під час дії перенапруг.

При значній концентрації потужностей велике значення має надійність роботи ліній електропередач та усього комплексу обладнання: трансформаторів, генераторів, комутаційної апаратури, компенсуючих пристроїв. Значною мірою це забезпечується надійною роботою ізоляції електричних систем і обладнання при постійно діючих на неї короткочасно виникаючих внутрішніх або грозових перенапруг. Джерелом внутрішніх перенапруг є електрорушійні сили генераторів системи, а причиною – резонансні явища. Причинами грозових перенапруг є попадання блискавки в електрообладнання. Для захисту ЛЕП від ПУБ використовують заземлені

троси, які підвішують на опорах вище проводів лінії, захищаючи їх від попадання блискавки. Сумісне використання блискавкозахисних тросів і автоматичного повторного включення призводить до мінімуму аварійних відключень повітряних ліній при враженнях блискавкою. Крім порушення ЛЕП, враження блискавки призводить до появи на лініях імпульсів високої напруги, які розповсюджуються по проводах, доходять до підстанцій і діють на ізоляцію електрообладнання. Таким чином, на ізоляцію електроустановок діють: робоча напруга, імпульси внутрішніх перенапруг, довготривале підвищення напруги, імпульси грозових перенапруг. Збільшення надійності роботи електрообладнання в значній мірі пов'язано з прогресом у розвитку захисної апаратури. Взаємне погодження величини діючих перенапруг, характеристик захисної апаратури і електричних характеристик ізоляцій, що забезпечують надійну роботу і високу економічність електричної установки - називають **координацією** ізоляції і є одним з основних завдань при проектуванні і експлуатації електрообладнання.

1. ЗАХИСТ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ВІД УДАРІВ БЛИСКАВКИ

Інтенсивність грозової діяльності характеризується числом грозових днів або числом грозових годин у році. Вона істотно відрізняється для різних районів країни. У середньому на 1 км² площі Землі приходить приблизно 0,1 удару блискавки за один грозовий день. Число ударів блискавки за 100 грозових годин в споруду (ПС) з параметрами $A \times B$ і висотою h , (м) приблизно дорівнює:

$$N = 6,7 \cdot (A + 7h) \cdot (B + 7h) \cdot 10^{-6} \quad (1.1)$$

Число ударів блискавки у лінію електропередач довжиною за 100 грозових годин в лінію довженною 100 км при середній висоті підвісу верхнього проводу чи троса h_{cp} (м) приблизно дорівнює:

$$N \approx 4 \cdot h_{cp} \cdot \quad (1.2)$$

Залежно від довжини ЛЕП і висоти опор середнє число ударів блискавки в лінію за рік коливається від 250 (для ліній 750 кВ) до 5 (для ліній 35 кВ). При відсутності спеціального грозозахисту і недостатньої імпульсної міцності ізоляції ці удари блискавки в більшості випадків призводили б до перекриття ізоляції лінії і їх відключенню. Припустимі імпульсні напруги для ізоляції електроустаткування визначаються гарантованою імпульсною міцністю, що встановлена трохи нижче імпульсних випробувальних напруг (для ізоляторів, електричних апаратів і вимірювальних трансформаторів - на 10-15%, для силових трансформаторів - на 25%).

Прямий удар блискавки (ПУБ) є найбільш небезпечним з точки зору враження споруд і електрообладнання, оскільки він супроводжується механічним або тепловим руйнуванням об'єкта враження: розщепленням дерев'яних опор ЛЕП, руйнуванням бетонних та цегляних споруд, розплавленням проводів, виникненням пожеж. Вторинні прояви ПУБ виникають у вигляді електростатичної та електромагнітної індукції, які супроводжуються появою дуже високих потенціалів на металевих елементах електрообладнання.

Всі споруди залежно від їх призначення, інтенсивності грозової діяльності в місті їх розташування класифікуються трьома категоріями вибухо- і пожежонебезпечності.

До першої категорії відносять споруди, в яких присутні у відкритому вигляді небезпечні речовини, що можуть вибухнути від електричної іскри. До другої відносять споруди, в яких ці речовини присутні, але в вогнестійких контейнерах. До третій відносять усі інші споруди, де блискавка може спровокувати пожежу або механічні руйнування.

Від ПУБ електроустановки захищають стрижневими, тросовими або активними блискавковідводами, кожен з яких складається з блискавкоприймача, струмопровіда і заземлювача. Усі блискавковідводи поділяються на поодинокі, подвійні та багаторазові. Будівлі з добре заземленим металевим дахом не вимагають захисту блискавковідводами. У відкритих

розподільних пристроях (ВРП) 110 кВ і вище дозволяється встановлювати блискавковідводи безпосередньо на металевих конструкціях, а у ВРП 35 кВ рекомендується встановлювати їх окремо.

Основними вихідними даними для розрахунку зони захисту об'єкта від ПУБ є його габарити, величина питомого опору ґрунту, геологічні та метеорологічні умови. Зони захисту поділяються на два типи: зона А має ступень захисту 99,5 % і вище; зона В – 95% і вище. Теоретичний аналіз експериментальних досліджень фізичної моделі свідчить, що зона захисту блискавковідводу являє собою конус, утворений гіперболою, яка обертається навколо вертикальної прямої (стрижня). Але для інженерних розрахунків гіпербола апроксимована ламаною лінією, що дозволило знайти простий аналітичний вираз, зручний для розрахунків.

2. РОЗРАХУНОК ЗОНИ ЗАХИСТУ ПІДСТАНЦІЙ

Приклад завдання.

Розрахувати графоаналітичним методом:

1. Зону захисту підстанції 110/10 кВ від прямих ударів блискавки.

$A \times B = 84 \times 74$ (м) – площа захищаного об'єкта.

$h_x = 5$ м – висота захищаного об'єкта.

2. Побудувати графічну залежність радіусу зони захисту r_x від висоти блискавковідводу h і визначити їх оптимальне співвідношення.

3. Спроекувати та розрахувати грозозахисне заземлення.

4. Забезпечити захист ПС від набігаючих імпульсів перенапруг.

5. Розрахувати довжину захищеного підходу до ПС.

6. Побудувати графічну залежність довжини захищеного підходу до ПС від допустимої крутості фронту $a_{кр}$ імпульсу перенапруги.

2.1. Розрахунок зони захисту одиночного стрижневого блискавковідводу

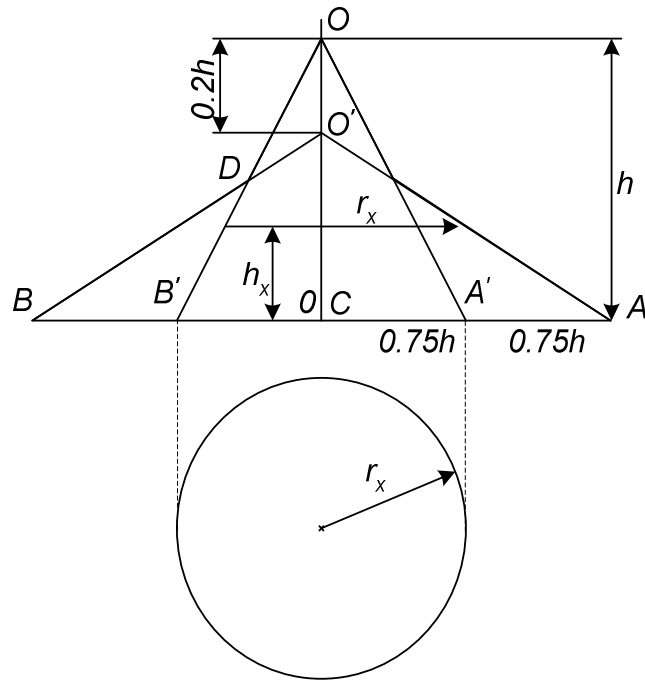


Рис. 2.1 – Геометрична побудова зони захисту одиночного стрижневого блискавковідводу

Послідовність побудови зони захисту по (I_m) для блискавковідводів з висотою $h \leq 60$ м. наступна.

1. Відкладаємо від основи двічі відрізки CA' , CB' на відстані $0,75h$;
2. На висоті $h_0 = 0,8 \cdot h$ ставимо точку O' ;
3. Точку O' з'єднуємо з A і B ($CA = CB = 1,5h$);
4. Точку O з'єднуємо з A' і B' .

Проводимо ламану лінію BDO , яка є утворною конуса зони захисту.

Для визначення радіуса зони захисту r_x на будь-якій висоті h_x 1 методом (ламаної) використовуємо формули:

$$r_x = 1,5(h - 1,25h_x) \quad \text{при } 0 \leq h_x \leq \frac{2}{3}h. \quad (2.1)$$

$$r_x = 0,75(h - h_x) \quad \text{при } h_x > \frac{2}{3}h. \quad (2.2)$$

Вирішуючи ці рівняння відносно висоти h блискавковідводу одержимо при заданих значеннях r_x і h_x оптимальну висоту блискавковідводу в метрах:

$$h_{opt} = \frac{r_x + 1,9h_x}{1,5}, \quad \text{і} \quad h_{opt} = \frac{r_x + 0,75h_x}{0,75}. \quad (2.3)$$

Величину r_x визначаємо з прямокутного трикутника, який утворений діагоналлю прямокутника і двома сторонами А і В:

$$r_x = (\sqrt{A^2 + B^2}) / 2. \quad (2.4)$$

Для блискавковідводів з висотою $h \approx 60 \div 100$ зона захисту (I_m) визначається, виходячи з лімітованого радіуса основи конуса $r_x = 90$ м.

Тоді радіус зони захисту на висоті h_x визначають зі співвідношень:

$$r_x = 90(1 \div 1,25 h_x / h) \quad \text{при } 0 \leq h_x \leq \frac{2}{3} h; \quad (2.5)$$

$$r_x = 45(1 - h_x / h) \quad \text{при } h_x > \frac{2}{3} h. \quad (2.6)$$

Визначення r_x за II методом (гіперболи) для блискавковідводів $h < 30$ м:

$$r_x = h_a \frac{1,6}{1 + \frac{h_x}{h}}, \quad (2.7)$$

і для $h > 30$ м:

$$r_x = h_a \frac{8,8}{\left(1 + \frac{h_x}{h}\right) \sqrt{h}}. \quad (2.8)$$

2.2. Розрахунок зони захисту подвійного стрижневого блискавковідводу

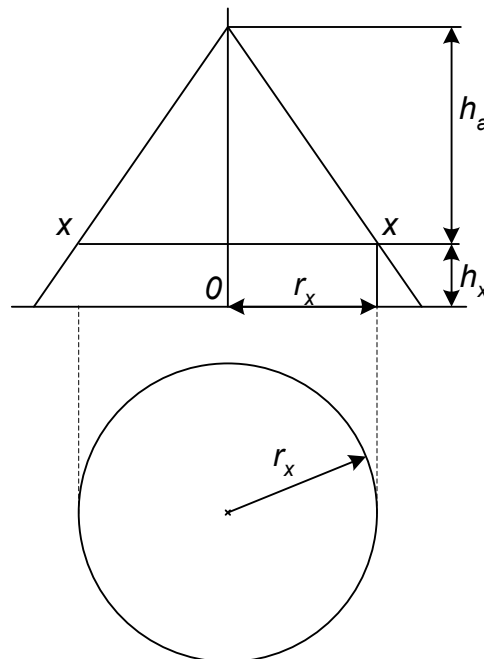


Рис. 2.2 – Розрахунок зони захисту стрижневого блискавковідводу

Зона захисту двох стрижневих блискавковідводів, розташованих на відстані $L < 5 \cdot h$, більша за зону захисту двох окремих блискавковідводів і розраховується з відповідних геометричних побудов (рис. 2.3). Якщо стрижневі блискавковідводи знаходяться на відстані $L > 5h$, їх треба розраховувати як окремі.

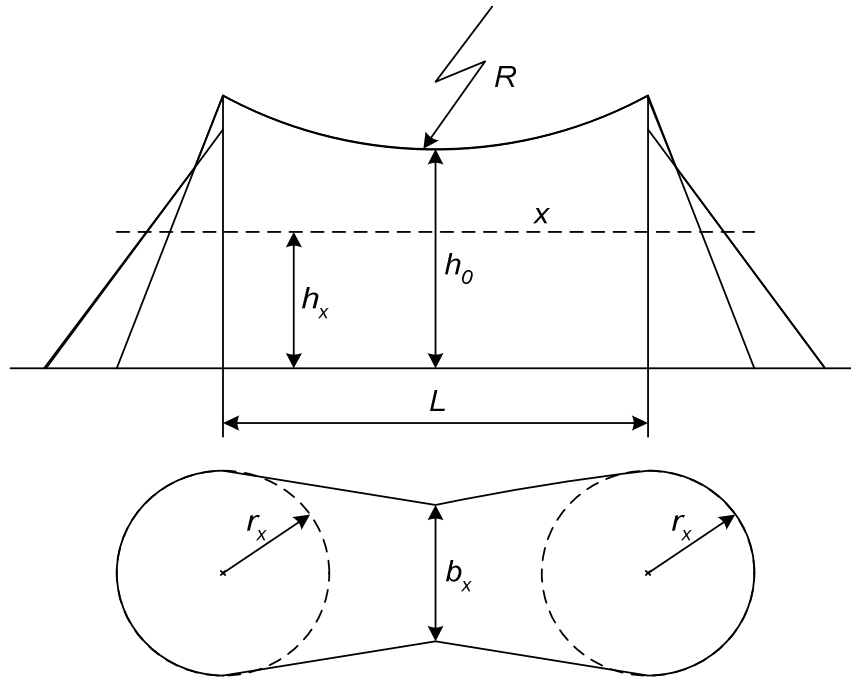


Рис. 2.3 – Побудова зони захисту подвійного стрижневого блискавковідводу

Блискавковідвід вважають подвійним, якщо $L/h \leq 5$. Верхня межа зони захисту являє собою дугу радіусом $R = 4h - h_0$. Висоту h_0 обчислюємо за емпіричною формулою

$$h_0 = 4h - \sqrt{9h^2 + 0,25L^2} \text{ , м.} \quad (2.9)$$

Радіус кола R визначаємо таким чином: $R = 4h - h_0$.

Якщо h_0 і L відомі, то оптимальну висоту h блискавковідводу знаходимо за формулою:

$$h_{opt} = 0,571h_0 + \sqrt{0,183h_0^2 + 0,0357L^2} \text{ ,} \quad (2.10)$$

де h_0 обчислюється виходячи з необхідної ширини зони захисту b_x , яка визначається висотою об'єкта, що захищається, і його розмірами в

горизонтальній площині:

$$b_x = 3(h_0 - 1,25h_x) \text{ при } 0 \leq h_x \leq \frac{2}{3}h, \quad (2.11)$$

$$b_x = 1,5(h_0 - h_x) \text{ при } h_x > \frac{2}{3}h, \quad (2.12)$$

вирішуючи їх відносно h_0 , знаходимо:

$$h_0 = \frac{b_x + 3,75h_x}{3} \quad \text{і} \quad h_0 = \frac{b_x + 1,5h_x}{1,5}. \quad (2.13)$$

2.3. Розрахунок зони захисту подвійного стрижневого блискавковідводу різної висоти

Спочатку будуємо зону захисту блискавковідводу більшої висоти і торцеву частину зони захисту нижчого блискавковідводу. Потім з вершини нижчого блискавковідводу проводимо горизонтальну лінію до перетину з утвірною першого і вважаємо точку перетину вершиною фіктивного блискавковідводу. Далі як звичайно, для двох однакових блискавковідводів будуємо зону захисту внутрішньої області (рис. 2.4).

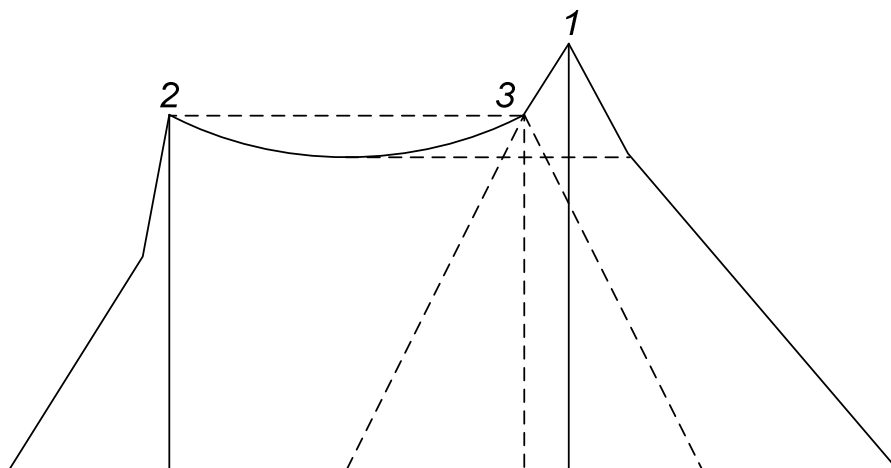


Рис. 2.4– Побудова зони захисту різновисотних блискавковідводів

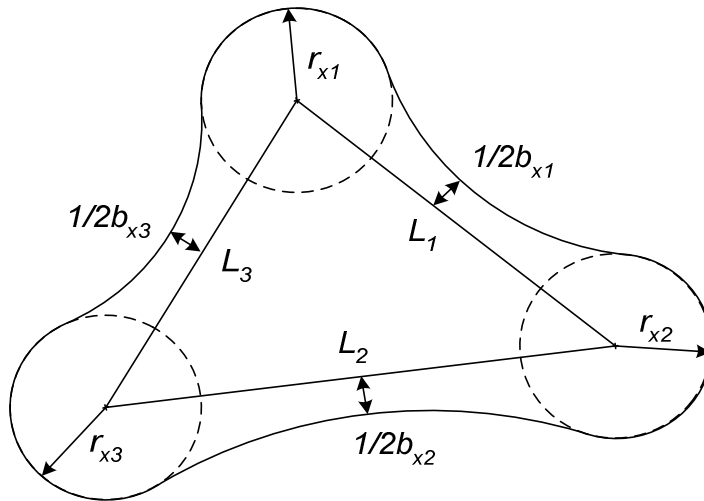


Рис. 2.5 – Побудова зони захисту багаторазових блискавковідводів

Для розрахунку і побудови зовнішніх меж зони захисту використовують ті ж самі принципи, що і для поодиноких блискавковідводів. При цьому блискавковідводи рахують попарно як зони захисту подвійних блискавковідводів в такій послідовності: 1-2; 2-3; 3-1.

При використанні 4-х і більше стрижневих блискавковідводів необхідне виконання додаткових умов:

- * для споруд 1-ої і 2-ої категорій треба приймати $h_0 \geq h_x$ для попарно взятих блискавковідводів, за діагоналями багатокутника, утвореного одиничними блискавковідводами;
- * для споруд 3-ої категорії допускається $D \leq 5h_a$ (D – довжина діагоналі многокутника, складеного одиничними блискавковідводами);
- * для блискавковідводів висотою $h > 30$ м значення D повинно бути зменшене на величину коефіцієнта $p = 5,5/\sqrt{h}$.

Умова непрориву блискавки в зону захисту має вигляд: $D \leq 8h_a$.

2.4. Розрахунок зони захисту тросових блискавковідводів

Розрахунок першим методом здійснюється таким чином:

$$r_x = 1,25(h_{mp} - 1,25h_x) \quad \text{при} \quad 0 \leq h_x \leq \frac{2}{3}h_{mp}; \quad (2.14)$$

$$r_x = 0,625(h_{mp} - h_x) \quad \text{при} \quad h_x > \frac{2}{3}h_{mp}, \quad (2.15)$$

де h_{mp} – висота троса над об'єктом, що захищається;

$h_{mp} = h - f$, (f – стріла прогину).

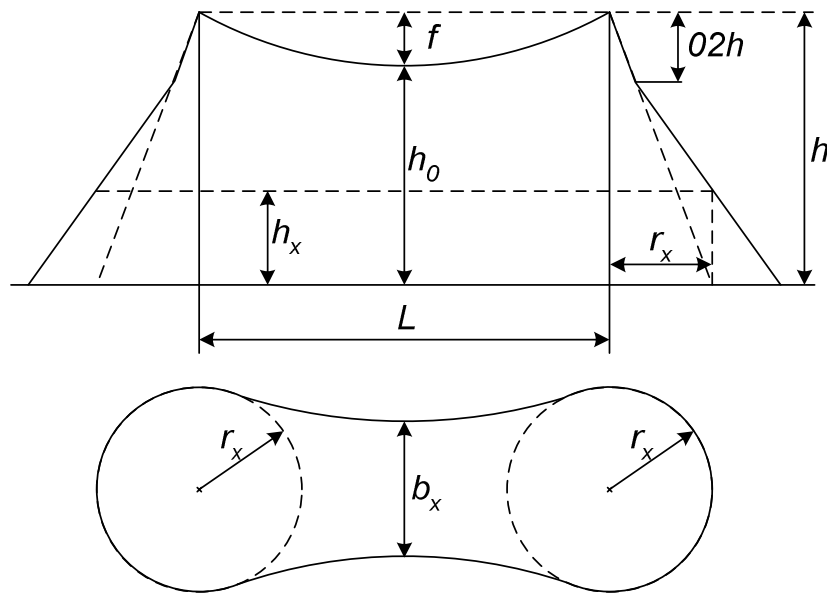


Рис. 2.6 – Побудова зони захисту тросового блискавковідводу

Повна ширина зони захисту при $h_x = 0$, дорівнює: $2r_x = 2,5h_{mp}$.

За другим методом радіус захисту r_x визначаємо за формулою

$$r_x = h_a \frac{1,2}{1 + h_x/h_{mp}}. \quad (2.16)$$

Важливим техніко-економічним фактором є температура, що визначає стрілу прогину. За $T_{\max}^{\circ}\text{C}$ приймають 40°C . Стрілу прогину в будь-якій ділянці польоту знаходимо таким чином:

$$f_{np} = 4f \cdot \frac{l_1}{L} \left(1 - \frac{l_1}{L}\right) - \text{при однакових рівнях підвісу}. \quad (2.17)$$

$$f_{np} = \frac{l_1}{L} \Delta h + 4f \cdot \frac{l_1}{L} \left(1 - \frac{l_1}{L}\right) - \text{при різних рівнях ділянок підвісу}. \quad (2.18)$$

Тут Δh – різниця відміток підвісу троса, м; l_1 – відстань від несучої конструкції з більшою висотою підвісу троса до розглянутої ділянки, м.

Грозі передуює вітер – трос відхиляється і об'єкт може бути уражений блискавкою. Відхилення троса визначається співвідношенням:

$$\sin \varphi = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}, \quad (2.19)$$

де φ – кут відхилення троса; γ_1 – питоме навантаження на трос від тиску вітру, (Н/м·мм²); γ_2 – питоме навантаження від власної маси троса і тиску вітру, (Н/м·мм²).

Горизонтальна проекція відхилення троса в будь-якій ділянці прольоту в м:

$$c = f_n \cdot \sin \varphi. \quad (2.20)$$

Треба враховувати і збільшення висоти блискавкоприймача h_{mp} при його відхиленні Δh_{mp} від вітру:

$$\Delta h_{mp} = f_n - \sqrt{f_n^2 - c^2}. \quad (2.21)$$

Тоді висота тросового блискавкоприймача у відхиленому положенні дорівнюватиме:

$$h'_{mp} = h_{mp} + \Delta h_{mp}. \quad (2.22)$$

Для об'єкта, що захищається, необхідно виконати умову непрориву блискавки в зону захисту:

$$D \leq 8 \cdot h_a \quad (2.23)$$

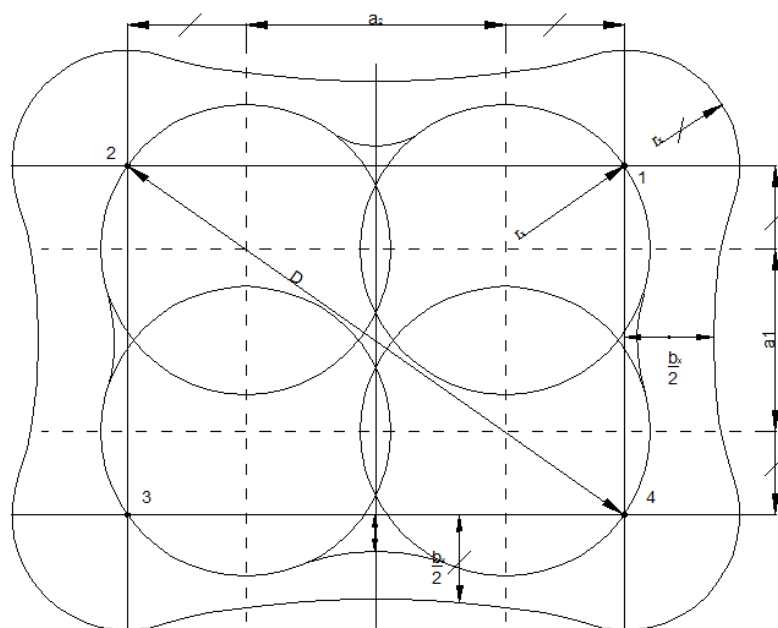


Рис. 2.7 – Зона захисту чотирьох стрижневих блискавковідводів на рівні h_x

2.5. Розрахунок допустимої відстані блискавковідводу до захищеного об'єкта

Оскільки при ПУБ елементи блискавковідводу набувають високого потенціалу, - стає можливим попадання його на захищений об'єкт. Тому необхідно розташовувати блискавковідвід на деякій відстані від об'єкта.

Ця відстань в повітрі S_n і в землі S_z залежить від імпульсної напруги і струму блискавки:

$$U_i = \frac{I_0}{2} + \left[R_i + \sqrt{R_i^2 + (\omega \cdot L^2)} \right], \quad (2.24)$$

де I_0 – амплітуда імпульсу струму блискавки, кА; R_i – імпульсний опір заземлення, Ом; L – індуктивність струмопроводу, Гн.

Питома індуктивність струмопроводу $L_0 = 1,5$ мк Гн/м. Максимальна крутість імпульсу струму блискавки –60 кА/мкс. Амплітуда струму блискавки –150кА.

Враховуючи, що $\omega = 2\pi \cdot f$, то для струму 150 кА отримаємо: $\omega \cdot L = 1,2 \cdot l$ (l – довжина струмопроводу, м).

Розрахункова імпульсна міцність повітря $U_n = 500$ кВ/м, землі: $U_z = 300$ кВ/м.

Тоді формули для визначення допустимої відстані S при струмі блискавки

$I_0 = 150$ кА мають вигляд:

$$S_n = 0,15 \cdot (R_i + \sqrt{R_i^2 + 1,44l^2}); \quad (2.25)$$

$$S_z = 0,375 \cdot (R_i + \sqrt{R_i^2 + 1,44l^2}). \quad (2.26)$$

Висновок

Виходячи з того, що $D = 192 \text{ м} \leq h_a \cdot p = 8 \cdot 24 = 192 \text{ м}$, прорив блискавки всередину зони, що захищається, буде неможливим.

3. Розрахунок грозозахисного заземлення

Заземлювачі – це електротехнічні пристрої, призначені для створення надійних низькоомних заземлень блискавководів і струмопроводів, певних частин електричних машин і апаратів з метою грозозахисту і захисту від перенапруг, забезпечення прийнятних режимів роботи електроустановок, захисту їхнього персоналу від враження електричним струмом. Розрізняють **робоче, захисне і грозозахисне** заземлення.

Робоче заземлення забезпечує нормальну роботу електроустановок, її частин і мереж відповідно до прийнятого для них режиму функціонування. Це -заземлення нейтралів силових трансформаторів, генераторів, реакторів поперечної компенсації на довгих лініях електропостачання.

Захисне заземлення забезпечує безпеку персоналу при обслуговуванні електроустановок. Це – заземлення зовнішніх металевих частин машин, трансформаторів, апаратів, які в нормальному режимі знаходяться не під напругою.

Грозозахисне заземлення необхідне для забезпечення ефективного грозозахисту електроустановок від перенапруг. До нього відносять заземлення стрижневих і тросових блискавководів, металевих дахів, будівель та споруд, металевих та залізобетонних опор ліній електропередач та порталів розподільчих пристроїв, заземлення іскрових проміжків і розрядників. Заземлення складається із заземлювача, який безпосередньо розташований в землі, і струмопроводів, які з'єднують апарати, що заземлюються, із заземлювачем.

Опір розтіканню струму заземлювача залежить в першу чергу від питомого опору ґрунту ρ , вимірюваного в Ом.см. Величини ρ різних ґрунтів наведені в табл. 3.1.

Опір заземлювача визначають згідно з ПУЕ за виразом:

$$R_z \leq \frac{U_p}{I_\phi}, \quad \text{де } U_p = 125 \text{ кВ.} \quad (3.1)$$

Імпульсний опір заземлювача визначається добутком стаціонарного опору R_z на імпульсний коефіцієнт a_i : $R_i = a_i \cdot R_z$.

Для установок напругою більш, ніж 1 кВ, опір заземлюючого пристрою R_i повинен бути не більший за 0,5 Ом, при цьому опір штучного заземлювача не повинен перевищувати 1 Ом.

Таблиця 3.1 – Значення питомого опору ґрунтів

Ґрунти	Питомий опір ρ , Ом·см	Ґрунти	Питомий опір ρ , Ом·см
Пісок	$7 \cdot 10^4$	Садкова земля	$0,4 \cdot 10^4$
Супісок	$3 \cdot 10^4$	Чорнозем	$2 \cdot 10^4$
Суглинок	$4 \cdot 10^4$	Торф	$0,2 \cdot 10^4$
Глина	$0,4 \cdot 10^4$	Кам'яний ґрунт	$40 \cdot 10^4$

При розрахунках величини ρ , які наведені у табл. 3.1, повинні множитися на коефіцієнт сезонності K (табл.3.2.), що залежать від кліматичних зон і виду заземлювача.

Розподіл областей і країн за кліматичними зонами наводиться в електротехнічних довідниках. Україна відноситься до II кліматичної зони.

При розрахунках використовують природні заземлювачі – це, в першу чергу, сталеві водопровідні труби без антикорозійного покриття зі звареними стиками і свинцеві оболонки кабелів. Для попередніх розрахунків можна користатися даними про опір розтіканню водопровідних труб, наведеними у табл. 3.3. для $\rho = 2 \cdot 10^4$ Ом · см.

Таблиця 3.2 Значення коефіцієнту сезонності для різних кліматичних зон

Кліматичні зони	Вид заземлювача	
	Протяжний	Стрижневий
	Коефіцієнт сезонності	
	K_n	K_c
I	7	2
II	4	1,7
III	2	1,4
IV	1,5	1,2

Оскільки водопровідні труби прокладаються нижче глибини промерзання ґрунту і мають приблизно постійний опір розтіканню на протязі всього року – для них коефіцієнт сезонності не використовують.

Дані про опір розтіканню струму металевих трубопроводів, прокладених на глибині 2м при $\rho=2 \cdot 10^4$ Ом·см, наведені у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Величина опору заземлювача у вигляді труби

Довжина підземної ділянки, м	Опір розтіканню Ом, при діаметрі труби, см		
	2,5	4	6
100	0,35	0,28	0,23
500	0,29	0,24	0,19
1000	0,25	0,2	0,17
2000	0,2	0,17	0,15

Таблиця 3.4 – Опір розтіканню струму свинцевих оболонок кабелів при $\rho = 2 \cdot 10^4$ Ом·см на глибині прокладення 0,4 м.

Довжина підземної ділянки, м	Опір розтіканню Ом, при перерізі кабелю, мм ²		
	16–35	50–95	120 і вище
50	2,1	1,6	1,2
100	2,0	1,5	1,1
200	1,8	1,4	1,0
500	1,4	1,1	0,8
1000	1,2	0,9	0,7

Використання кабелів зі свинцевою оболонкою в якості природних заземлювачів допускається, якщо їх покладено не менше двох.

Якщо у траншеї прокладено кілька кабелів, то загальний опір розтіканню струму з урахуванням явища взаємного екранування R_x визначається за формулою

$$R_k = \frac{R_{ok}}{\sqrt{n}}, \quad (3.2)$$

де R_{ok} - опір розтіканню струму оболонки одного кабелю;

n – число кабелів в одній траншеї.

Якщо опір розтіканню природних заземлювачів перевищує необхідне за норми, то додатково влаштовується штучний заземлювач, опір якого $R_{ш}$ визначається за формулою

$$R_{ш} \leq \frac{R_n \cdot R_i}{R_n - R_i}, \quad (3.3)$$

де R_i - величина опору пристрою, що заземлює, за нормами; R_n – опір природного заземлювача.

Провідність штучного заземлювача складається з провідності стрижневих і горизонтальних смугових елементів. Опір розтікання одиночного стрижневого заземлювача зі сталеві труби розраховують за формулою:

$$R_g = \frac{0,366 \cdot \rho_p}{l} \left(\lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right), \quad (3.4)$$

де l – довжина труби, см; d – зовнішній діаметр труби, см; t – відстань від поверхні ґрунту до середини труби, см.

Для застосовуваних на практиці труб довжиною 2,5 м, діаметром 0,06 м і глибиною занурення в ґрунт, рахуючи від поверхні ґрунту до верха труби 0,7 м, можна користуватися спрощеної формулою

$$R_m = 0,308 \cdot \rho. \quad (3.5)$$

Для кутової сталі 50 х 50 х 5 мм довжиною 2,5 м можна користуватися наступною формулою:

$$R_k = 0,318 \cdot \rho. \quad (3.6)$$

Для куточка 60 х 60 х 6 мм довжиною 2,5 м :

$$R_k = 0,298 \cdot \rho. \quad (3.7)$$

Для протяжних заземлювачів опір розтіканню струму визначають для сталеві смуги довжиною l , шириною b і глибиною занурення t :

$$R_n = \frac{2,3 \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \lg \frac{2l^2}{b \cdot t}, \quad (3.8)$$

для круглої сталі:

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \ln \frac{4l}{d}, \quad (3.9)$$

де d – діаметр круглої сталі, см; l – глибина закладення заземлювача, см.

Далі знаходять число стрижнів, враховуючи, що вони з'єднані паралельно за

формулою

$$n = \frac{R_{m\Sigma}}{R_{m1}}. \quad (3.10)$$

3.1. Приклад 1 розрахунку заземлення

Потрібно розрахувати заземлення міської трансформаторної підстанції ПС 35/10 кВ з глухо заземленою нейтраллю на стороні низької напруги. Заземлення є загальним для устаткування високої та низької напруги. За даними енергосистеми струм замикання на землю (ємнісний) в даній точці мережі складає 100 А. До підстанції підведені три кабелі високої напруги АСБ - 10 кВ (3х95) довжиною по 500 м прокладені в одній траншеї. Підстанція розміщена в II кліматичній зоні; ґрунт — суглінок.

Оскільки заземлення є загальним для устаткування високої та низької напруги, опір розтікання повинен бути:

- для установок низької напруги – $R_z < 4$ Ом;
- для установок високої напруги – $R_i < 125 / 150 = 0,8$ Ом.

Визначаємо опір розтікання одиночного кабелю (див. табл. 3.1)

$R_{ок} = 1,1$ Ом. З урахуванням коефіцієнту K_c сезонності для другої кліматичної зони (табл.3.2): $R_{ок} = 1,1 \cdot 1,7 = 1,87$ Ом.

1. Загальний опір розтікання трьох кабелів буде:

$$R_{3к} = \frac{R_{1к}}{\sqrt{3}} = \frac{1,87}{\sqrt{3}} = 1 \text{ Ом.}$$

2. Розрахунковий опір розтікання штучного заземлювача повинен бути не більше:

$$R_{ш} = 1 \cdot 0,8 / 1 + 0,8 = 0,55 \text{ Ом.}$$

3. Враховуючи те, що до заземлюючого пристрою приєднуються об'єкти високої напруги, виконуємо його у вигляді замкнутого контуру.
4. Приймаємо орієнтовно 20 стрижнів з кутової сталі розміром 50 x50 x5мм, довжиною 2,5 м, що знаходиться на відстані один від одного 4,5м і з'єднаних сталюю смугою розміром 40 x4 мм.
5. Визначаємо опір розтікання одного стрижня за формулою

$$R_{o.v.} = 0,00318 \, p \cdot K_c.$$

6. Приймаємо за табл. 3.1: $\rho = 1 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, та за табл. 3.2 – $K_c = 1,7$,
тоді: $R_{o.v.} = 54,1 \text{ Ом}$.

7. Приймаємо довжину сталевої смуги 120 м і визначаємо опір розтікання за вищевказаними формулами (3.8):

$R_{\text{J}}=6.05 \text{ O}_{\text{M}}$

- З урахуванням екранування між смугою та стержнями (за табл.3.6):

$$K_{e2} = 0,31,$$

- тоді: $R_{\Gamma\Sigma} = 19,5 \text{ O}_M$.

8. Необхідний опір розтікання стрижнів складає:

$$R_c = 3,06 \text{ O}_M.$$

9. Визначаємо кількість n стрижнів, враховуючи, що коефіцієнт використання

$$K_{\text{еБ}} = 0,62, \quad \text{тоді } n = 2.$$

Після монтажу слід провести виміри фактичної величини опору розтікання струму блискавки заземлюючого пристрою.

3.2. Приклад 2 розрахунку заземлення

1. Відповідно до Укр. ПУЕ визначають опір заземлювача ($R_z < 1 \text{ Ом}$).
2. Відповідно до відведеної території розробляють конструкцію, визначають конфігурацію і місце розташування заземлювача (по контуру и площині).
3. Визначають остаточно опір штучного імпульсного заземлення R_i .

4. Визначають розрахунковий питомий опір ґрунту ρ_p з врахуванням підвищуючого коефіцієнта, що враховує його висихання та промерзання K_n .

$$(K_{пг} = 2; K_{пв} = 1,4); \quad \rho_{pв} = K_{пв} \cdot \rho; \quad \rho_{pг} = K_{пг} \cdot \rho. \quad (3.11)$$

5. Визначають опір розтіканню струму горизонтального заземлювача:

$$R_{г\Sigma} = \frac{\rho_{пг}}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{2 \cdot l^2}{b \cdot t}, \quad (3.12)$$

де l – загальна довжина горизонтального заземлювача; b – ширина смуги (4 см); t – її товщина (4 мм).

6. Визначають розрахунковий опір розтікання горизонтального заземлювача $R_{ргв}$ з врахуванням коефіцієнта використання $K_{вг}$, який враховує взаємне екранування сусідніх електродів ($K_{вг} = 0,8$):

$$R_{ргв} = R_{рг} / K_{вг}. \quad (3.13)$$

7. Визначають опір розтіканню одного вертикального заземлювача:

$$R_{в1} = \frac{\rho_{пв}}{2\pi \cdot l} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l}{d} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot t + l}{4 \cdot t - l} \right), \quad (3.14)$$

де $\rho_{пв}$ – розрахунковий питомий опір ґрунта для вертикального заземлювача; l – довжина вертикального заземлювача; t – відстань від поверхні землі до середини заглибленого заземлювача; d – діаметр вертикального заземлювача (верхній кінець заземлювача заглиблений на 0,7 м).

8. Визначають розрахунковий опір вертикального заземлювача з врахуванням коефіцієнта використання $K_{вв}$ ($K_{вв} = 0,61$).

$$R_{в1р} = R_{в1} / K_{вв}. \quad (3.15)$$

9. Визначають необхідний опір вертикальних заземлювачів з врахуванням сумарного опору горизонтальних заземлювачів:

$$R_{в\Sigma} = R_{ргв} \cdot R_i / (R_{ргв} - R_i). \quad (3.16)$$

10. Визначають число вертикальних електродів N за формулою

$$N = R_{в\Sigma} / R_{в1р}. \quad (3.17)$$

4. Захист ПС від імпульсів набігаючих перенапруг

Ізоляція електроустановок повинна надійно працювати як при довгостроково прикладених робочих напругах промислової частоти, так і при виникаючих короточасних перенапругах грозового чи комутаційного характеру. Грозові перенапруги виникають при прямому ударі блискавки в електроустановку, а також при ударі блискавки в землю чи предмети, або об'єкти, що знаходяться поблизу електроустановки (індукційні перенапруги). Комутаційні (внутрішні) перенапруги виникають при різного роду комутаціях ланцюгів у нормальних експлуатаційних умовах, а також при комутаціях, пов'язаних з виникненням і ліквідацією аварійних режимів і ушкоджень в електричній системі.

Від грозових перенапруг основним елементом захисту є вентильні розрядники різного типу і метало-оксидні обмежувачі (ОПН).

Рівень грозових перенапруг мережі не залежить від її номінальної напруги, а рівень внутрішніх перенапруг, навпаки, залежить від величини номінальної напруги. З цієї причини вибір рівня ізоляції електроустаткування до 220 кВ включно, в основному лімітується рівнем грозових перенапруг, а рівень ізоляції електроустаткування 330 кВ і вище – рівнем внутрішніх перенапруг.

4.1. Внутрішні перенапруги

Внутрішні перенапруги поділяються на квазістаціонарні та комутаційні. *Квазістаціонарні* перенапруги, які існують відносно тривалий період часу, виникають при однофазних замиканнях, при неповнофазних режимах, при роботі довгих ЛЕП на холостому ході, при КЗ, а також при виникненні в мережі резонансу або ферорезонансу на основній частоті, високих чи низьких гармоніках. *Комутаційні* перенапруги виникають при включенні чи відключенні ЛЕП, трансформаторів, реакторів і дугогасних котушок, при виникненні дуги замикання на землю в системах з незаземленими нейтралями.

Внутрішні перенапруги характеризуються кратністю:

$$K = U_{\text{макс}} / U_{\text{ф.раб.нб}}, \quad (4.1)$$

тривалістю фронту комутаційного імпульсу – $\tau_{\text{ф}} = 250 \pm 50$ мкс та тривалістю імпульсу – $\tau_i = 2500 \pm 500$ мкс (250/2500 мкс).

В енергосистемах України з врахуванням можливих величин перенапруг і техніко-економічних характеристик, згідно з рекомендаціями МЕК, рівень електричної міцності ізоляції для комутаційних перенапруг повинен складати близько 80% імпульсного рівня ізоляції.

4.2. Грозові перенапруги

Грозові перенапруги характеризуються струмом блискавки, який має вигляд уніполярного аперіодичного імпульсу з амплітудою струму – $I_{\text{б}}$, тривалістю імпульсу – τ_i , тривалістю фронту імпульсу – $\tau_{\text{ф}}$ і середньою крутістю a :

$$a = dI_{\text{макс}} / dt_p. \quad (4.2)$$

Зареєстровано амплітуди струмів блискавки від сотень амперів до 300 кА із середньою крутістю a від 2 до 60 кА/мкс і тривалістю від 20 до 80 мкс. Імовірність появи блискавок з верхню межу параметрів достатньо мала, тому за розрахункові звичайно приймають:

$$I_{\text{б.макс}} = 150 \text{ кА}; \quad a = 60 \text{ кА/мкс}; \quad \tau_i = 40 \text{ мкс}; \quad \tau_{\text{ф}} = 1,5 \text{ мкс}.$$

Виникаючи під час грози в лініях електропередачі імпульси грозових перенапруг поширюються по мережі і впливають на ізоляцію як самих ЛЕП, так і електрообладнання електричних станцій і підстанцій. Захист електроустановок від грозових перенапруг здійснюється розрядниками і ОПН. Основним засобом захисту від грозових перенапруг є вентильні розрядники і ОПН. Їх використовують для захисту підстанційної ізоляції і встановлюють на збірних шинах електроустановок, якщо до них підключені повітряні лінії

електропередачі; на виводах вищої і середньої напруги автотрансформаторів; у ланцюгах силових трансформаторів і окремих ліній, якщо розрядники, встановлені на шинах, не забезпечують належного захисту устаткування; у нейтралях силових трансформаторів 110÷220 кВ, що працюють з ізольованою нейтраллю.

Для ефективного захисту ізоляції електроустановок від перенапруг використовують розрядники типів РВС (розрядник вентиляльний станційний), РВП (розрядник вентиляльний підстанційний), РВМ (розрядник вентиляльний магнітний) РЕМГ (розрядник вентиляльний з магнітним гасінням) і РВВМ (розрядник вентиляльний для обертаючих машин), а також ОПН (табл. 5.2– 5.4).

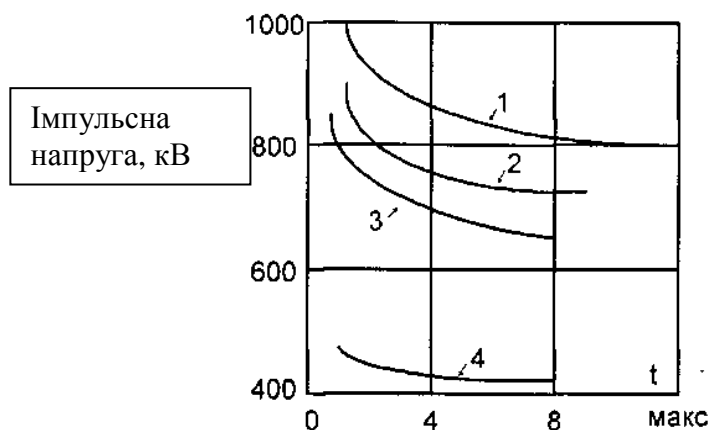


Рис. 4.1 – Імпульсні вольтамперні характеристики:

*1 - ізоляції ліній електропередач; 2 - трубчастого розрядника;
3 - потужного трансформатора; 4 - вентильного розрядника*

Гранична величина супровідного струму $I_{\text{супр. Макс}}$ для розрядників типу РВС дорівнює 80÷100 А, для розрядників типу РВМГ – 250 А.

Напруга гасіння розрядників для мереж із різним режимом нейтралів повинна задовольняти умові

$$U_{\text{гас}} = K_3 \cdot U_{\text{ном}}. \quad (4.3)$$

Мережі з ефективним заземленням нейтралів мають $K_3 = 0,8$, тому в них встановлюються так звані 80%-ві розрядники. В мережах 3÷35 кВ, де $K_3 = 1$,

встановлюються 100%-ві розрядники. Режими роботи таких розрядників (звичайно їх називають комутаційними) істотно відрізняються від роботи грозозахисних розрядників. Перші спроможні довгостроково пропускати і потім обірвати струми приблизно 1,5 кА при напрузі сталого режиму порядку $(1,5 \div 2)U_{\phi}$. Другі здатні, пропустивши короточасний великий імпульсний струм, – погасити дугу супровідного струму при напругах у мережі порядку $(1,2 \div 1,3)U_{\phi}$.

Магнітно-вентильні; розрядники (РВМГ) на напруги до 220 кВ включно здатні обмежувати як грозові, так і більшість комутаційних перенапруг. Для мереж 330÷750 кВ розроблені розрядники, які одержали найменування комбінованих магнітно-вентильних розрядників (тип РВМК). Вони мають комбіновану вольтамперну характеристику, яка при струмах до 1,5 кА відповідає характеристиці комутаційного розрядника, а при струмі більших за 1,5 кА – характеристиці грозозахисного розрядника, що дозволяє їм виконувати функції комутаційного і грозозахисного розрядника.

Максимальна напруга на підстанційному електроустаткуванні при грозових і комутаційних перенапругах залежить від крутості фронту хвилі, що набігає, характеристик розрядника, а також від відстані між розрядником і електроустаткуванням, що захищається.

4.3. Схема заміщення для хвильових процесів

Припустимо, що у вузловий точці А схеми рис.5.2 ввімкнені елементи R, L та C, а також лінія з хвильовим опором Z. Якщо на цей вузол набігає хвиля з лінії, то для схеми застосоване поняття падаючої, переломленої і відбитої хвилі. Хвиля з напругою U_{np} у точці А буде розповсюджуватись по лініях із хвильовим опором Z_n .

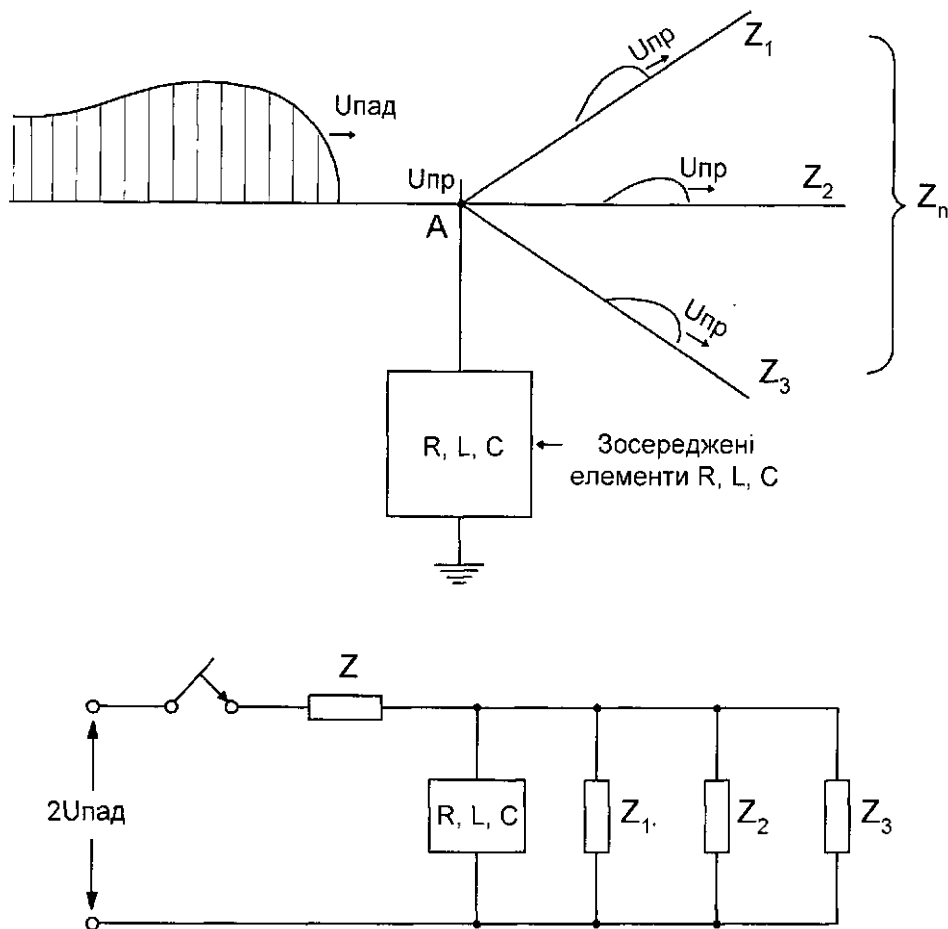


Рис. 4.2 – Схема заміщення для хвильових процесів

Для точки А можна записати:

$$U_{np} = U_{nad} + U_{vidb},$$

$$I_{np} = I_{nad} - I_{vidb},$$

$$U_{nad} = I_{nad} \cdot Z,$$

$$U_{vidb} = I_{vidb} \cdot Z.$$

Сумісне рішення цих рівнянь дає:

$$U_{np} = 2U_{nad} - I_{np} \cdot Z. \quad (4.4)$$

Дане рівняння показує, що для визначення переломленої хвилі напруги можна використати еквівалентну схему (рис.4.3), де ізоляція заміщена ємністю, і для якої дійсне рівняння:

$$2 U_{nad} = I_p \cdot Z + U_p, \quad (4.5)$$

тут I_p , U_p – струм і напруга розрядника

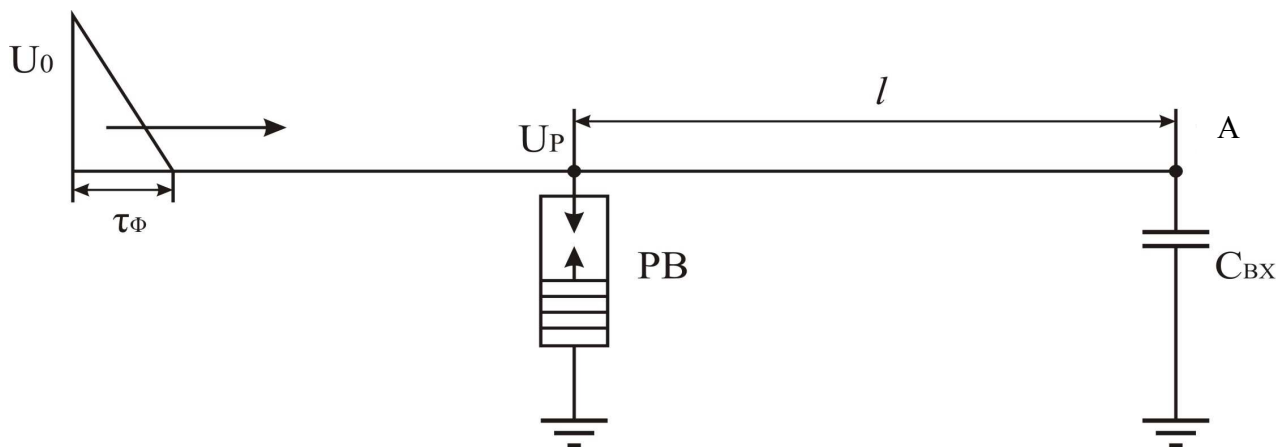


Рис. 4.3 – Еквівалентна схема підходу до підстанції

На вузлову точку А набігає хвиля з напругою $U_{\text{пад}} = at$. Рівняння (4.4) дозволяє визначити амплітуду хвилі, яка падає на розрядник і при якій струм координації буде знаходитись в заданих межах. Якщо він перевищить струм координації, напруга на розряднику може перевищити електричну міцність ізоляції. Внаслідок накладання відбитого імпульсу на падаючій, амплітуда напруги на розрядникові досягне:

$$U_{I_{\text{max}}} = a \cdot t_p + a \cdot (t_p - 2l/V), \quad (4.6)$$

тут l – відстань від РВ до точки А, V – швидкість розповсюдження імпульсу ($V = 300$ м/мкс). В точці А напруга за час $l/V = t_p$ досягне величини:

$$U_{A_{\text{max}}} = 2a \cdot t_p. \quad (4.7)$$

Різниця напруг на електрообладнанні і розряднику дорівнює:

$$\Delta U = U_{A_{\text{max}}} - U_{I_{\text{max}}} = 2a \cdot l/V. \quad (4.8)$$

Допустима напруга на трансформації підстанції визначається за виразом:

$$U_{\text{дон}} = 1,1 \cdot (U_{50\%} - 0,5 \cdot U_{\text{ном}}), \quad (4.9)$$

або:
$$U_{\text{дон}} = U_p + 2 \cdot a \cdot l_{\text{дон}} / V, \quad (4.10)$$

де U_p – напруга пробою розрядника.

Приклад 1. Визначити допустиму відстань від точки приєднання розрядника до трансформатора тупикової підстанції 35 (110) кВ, якщо відомо, що напруга пробою розрядника РВС-35 (110) кВ дорівнює 125 (285) кВ, залишкова напруга на розряднику 125 (315) кВ, рівень ізоляції трансформатора дорівнює

210 (335) кВ, а максимальна крутість імпульсу перенапруги $a=300$ (100) кВ/мкс.

Підставимо ці дані в (4.10):

$$210=125+ 2\cdot 300\cdot l_{\text{дон}} / 300 = 42,5 \text{ м};$$

$$335=285 + 2\cdot 100\cdot l_{\text{дон}} / 300 = 75 \text{ м}.$$

При розповсюдженні по лінії імпульс напруги деформується і затухає внаслідок імпульсної корони і опору землі, оскільки струм імпульсу замикається на землю. Тривалість фронту прямокутного деформованого імпульсу $t_{\text{фр}}$ після проходження ним відстані l :

$$t_{\text{фр}} = \rho \cdot l^2 / 260 \cdot h^2 \cdot Z^2, \text{ (мкс)}, \quad (4.11)$$

тут ρ – питомий опір ґрунта, Ом·м; h – середня висота підвісу проводів, м;

Z – хвильовий опір лінії, Ом.

Або:
$$t_{\text{фр}} = B \cdot U_{\text{max}} \cdot l / V, \quad (4.12)$$

а крутість фронту знизиться з ∞ до $a = U_{\text{Imax}} / t_{\text{фр}}$,

або
$$a = V / B \cdot l, \quad (4.13)$$

тут $B \sim 0,5 \cdot 10^{-3}$ (1/кВ).

Середню крутість фронту імпульсу можна визначити з виразу:

$$a_{\text{ср}} = I_0 / \tau_{\text{ф}}; \quad \text{або:} \quad a_{\text{ср}} = U_{50\%} / \tau_{\text{ф}}, \quad (4.14)$$

де $\tau_{\text{ф}} = l / V$, мкс.

Подовження фронту імпульсу напруги на 1 км пробігу:

$$\Delta \tau_{\text{ф}} = \left(0,5 + \frac{0,008 \cdot U_{\text{max}}}{h} \right) \cdot \frac{1}{K}, \quad (4.15)$$

де K – коефіцієнт = 1; 1,14; 1,45; 1,55 – для 1, 2, 3, 4 – числа проводів у фазі.

Амплітуда імпульсу при його розповсюдженні зменшується за законом:

$$U = U_{\text{max}} e^{-a\sqrt{x}}, \quad (4.16)$$

де x – відстань до точки удару блискавки; a – коефіцієнт = $0,07 \text{ км}^{-0,5}$ для ліній напругою 110 кВ і вище. При розрахунках U_{max} приймають рівним $U_{50\%}$ лінійної ізоляції, а зменшенням амплітуди імпульсу нехтують.

Деформація фронту імпульсу на відстані l від точки виникнення:

$$\Delta t \approx B \cdot U_{\max} \cdot (l / V). \quad (4.17)$$

Таблиця 4.1 – Величина 50% випробувальних напруг лінійної ізоляції

$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	35	110	220	330	500
$U_{50\%}, \text{кВ}$	200	480	750	1050	1550

Необхідну довжину захищеного підходу до ПС можна визначити за формулою:

$$l_{\text{зн}} \geq U_{50\%} / a_{\text{кр}} \cdot \Delta \tau_{\phi}, \text{ м}; \quad (4.18)$$

або:

$$l_{\text{зн}} \geq \left(\frac{V}{a_{\text{кр}} \cdot B} \right) \cdot 10^{-3}, \text{ м}. \quad (4.19)$$

4.4. Приклад розрахунку захищеного підходу до ПС

Приклад 1

Вихідні дані:

$$U_{\text{н}} = 35 \text{ кВ}; \quad U_{50\%} = 200 \text{ кВ}; \quad I_{\text{б}} = 60 \text{ кА};$$

$$K = 1,45; \quad B = 0,4; \quad Z = 300 \text{ Ом};$$

Визначаємо критичну крутість фронту імпульсу, що набігає на ПС:

$$a_{\text{кр}} = 60 \text{ кА/мкс} . \quad (a_{\text{кр}} = 40 \text{ кА/мкс}).$$

Знаходимо допустиму напругу на трансформаторі $U_{\text{дон}}$ за формулою (4.9):

$$U_{\text{дон}} = 1,1 \cdot (200 - 0,5 \cdot 35) = 200,75 \text{ кВ}.$$

Знаходимо зміну тривалості фронту імпульсу $\Delta \tau_{\phi}$ на 1 км лінії згідно з (4.10):

$$\Delta \tau_{\phi} = (0,5 + 0,008 \cdot U_{\max} / h) \cdot 1 / K = (0,5 + 0,008 \cdot 200 / 10) \cdot 1 / 1,45 = 0,44 \text{ с/км}.$$

Знаходимо довжину захищеного підходу до ПС згідно з (4.13):

$$l_{\text{зн}} \geq U_{50\%} / a_{\text{кр}} \cdot \Delta \tau_{\phi} = 200 / 40 \cdot 0,44 = 2,2 \text{ (км)};$$

$$l_{\text{зн}} \geq U_{50\%} / a_{\text{кр}} \cdot \Delta \tau_{\phi} = 200 / 60 \cdot 0,44 = 1,47 \text{ (км)}.$$

$$\text{Згідно з (4.16)} \quad l_{\text{зн}} \geq (300 / 40 \cdot 0,5) \cdot 10^{-3} = 18,75 \cdot 10^{-3} \text{ км}.$$

Знаходимо t_{ϕ} після проходження імпульсом відстані l_{zn} :

$$t_{\phi} = B \cdot U_{Amax} \cdot l_{zn} / V = 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2,2 / 0,33 = 3,3 \text{ мкс.};$$
$$t_{\phi} = 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,47 / 0,33 = 2,2 \text{ мкс.}$$

Розрахуємо деформацію фронту імпульсу після пробігу ним l_{zn} :

$$\Delta t (U) \approx l \cdot B \cdot U / V = 2,2 \cdot 0,5 \cdot 200 \cdot 10^{-3} / 300 = 0,733 \text{ мкс.}$$

Знаходимо час проходження імпульсом відстані l_{zn} :

$$t_p = l_{zn} / V = 2,2 / 0,33 = 6,66 \text{ мкс}$$

Знаходимо напругу в точці А (4.7):

$$U_{Amax} = 2 \cdot a \cdot t_p = 2 \cdot 40 \cdot 6,66 = 532,8 \text{ кВ.}$$

Знаходимо $\Delta U = U_{Amax} - U_{max} = 2 \cdot a \cdot l / V = 2 \cdot 60 \cdot 1,7 / 300 = 0,68 \text{ кВ.}$

$$\Delta U = U_{Amax} - U_{max} = 2 \cdot a \cdot l / V = 2 \cdot 40 \cdot 2,2 / 300 = 0,6 \text{ кВ.}$$

За результатами розрахунків вибираємо розрядник РВМ-35 (табл. 4.2) для захисту ПС від набігаючих імпульсів перенапружень.

Приклад 2. Визначити t_{ϕ} після пробігу $l_{zn} = 2 \text{ км}$ на лінії $Z = 500 \text{ Ом}$; $h = 10 \text{ м}$; $\rho = 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Використаємо формулу (4.11):

$$t_{\phi} = \frac{10^3 \cdot 4 \cdot 10^6}{260 \cdot 10^2 \cdot 25 \cdot 10^4} = 0,6 \text{ мкс.}$$

По результатам проведених розрахунків зробити висновок про придатність захисних апаратів до експлуатації та можливості включення їх у схему мережі.

Таблиця 4.2 - Значення опору вентильних розрядників (елементів розрядників)

Тип розрядника або елемента розрядника	Опір, МОм	
	не менше	не більше
РВМ-3	15	40
РВМ-6	100	250
РВМ-10	170	450
РВМ-15	600	2000
РВМ-20	1000	10000
Елементи розрядника РВМ-35:	600	2000
РВРД-3	95	200
РВРД-6	210	940
РВРД-10	770	5000
Елементи розрядника РВМЛ-66	250	1000
Елементи розрядників РВМА-220	400	2500
РВМГ-110М	400	2500
РВМГ-150М	400	2500
РВМГ-220М	400	2500
РВМГ-330М	400	2500
РВМГ-400, РВМГ-500	400	2500
Основний елемент розрядників РВМК-330	150	500
Іскровий елемент розрядників РВМК-330	300	1400
Основний елемент розрядника РВМК-400П	120	500
Іскровий елемент розрядника РВМК-400П	300	1400
Елемент розрядника РВМК-400В'''	1500	7000
Елемент розрядника РВМК-750М	1300	7000
* Розрядник складається з двох елементів. Дані уточнюються для кожної партії розрядників.		

Таблиця 4.3 – Допустимі струми провідності вентиляльних розрядників і елементів

Тип розрядника або елемента розрядника	Значення випрямленої напруги, при якій вимірюється струм провідності, кВ	Струм провідності, мкА, при температурі опору 20 °С	
		не менше	не більше
1	2	3	4
PBM-3	4	380	450
PBM-6	6	120	220
PBM-10	10	200	280
PBM-15	18	500	700
PBM-20	24	500	700
PBC-15	16	200	340
PBC-20	20	200	340
PBC-35*'	32	200	340
PBC-15	16	450	620
PBC-20	20	450	620
PBC-29	28	450	620
PBC-33	32	450	620
PBC-35	32	450	620
PBRД-3	3	30	85
PBRД-6	6	30	85
PBRД-10	10	30	85
PВ-25	28	400	650
PBE-25M	28	400	650
PBME-25	32	400	650
Елементи розрядників: PBMA-66, PBMA-220, PBMГ-110M, PBMГ-150M, PBMГ-220M	18	1000	1350
	-	1000	1350
	-	1000	1350
	30	1000	1350

Таблиця 4.4 - Допустимі значення струму провідності та найменші допустимі значення виміряного мегомметром опору обмежувача перенапруг (ОПН)

Тип обмежувача перенапруг	Найбільша робоча напруга (діюча), кВ	Діапазон допустимих значень струму провідності, виміряних при $U_{нр}$ під час випуску з підприємства - виготовлювача, мА	Значення випробної напруги промислової частоти, кВ	Значення струму провідності, діюче, мА, виміряне в експлуатації, при досягненні якого необхідно		Найменший допустимий опір ОПН, виміряний мегомметром 2,5 кВ, МОм
				ОПН Зняти з експлуатації	вирішувати питання щодо заміни ОПН	
ОПН-СН-6	4,0	Не більше 05	4,0	Більше 0,5	-	2000
ОПН-КС-10	7,0	Не більше 0,5	7,0	Більше 0,5	-	5000
ОПН-П1-Е	7,2	-	7,2	Вище $\pm 20\%$	-	~
ОПН-П1-10	12,0	-	12,0	Те саме	-	-
ОПН-П1-15	18,0	-	18,0	„	-	-
ОПН-П1-20	24,0	-	24,0	„	-	-
ОПН-П1-35	40,5	-	40,5	„	-	-
ОПН-35	40,5	0,5-0,3	40,5	1,2	1,0	3000
ОПН-110	73,0	0,4-0,65	73,0	1,2	1,0	3000
ОПН-150	100,0	0,5-0,8	100,0	1,5	1,2	3000
ОПН-220	146,0	0,6-0,9	100,0	1,8	1,4	3000
ОПН-330	210,0	1,1-1,5	100,0	3,0	2,4	3000
ОПН-500	303,0	1,8-2,8	100,0	5,5(4,5)*	4,5(3,8)	3000
ОПН-750	455,0	1,7-3,8	100,0	7,2	6,0	3000
ОПНО-750	455,0	1,4-2,9	100,0	5,5	4,5	3000

* У дужках наведено дані для ОПН-500ПН кожного елемента випуску після 1991 р.

Рекомендації щодо оформлення роботи

Роботу необхідно оформлювати на аркушах формату А4. На титульному аркуші повинно бути вказано: прізвище, ім'я та по батькові студента, курс, група, спеціальність. Крім того, вказують посаду та прізвище викладача, який викладає цю дисципліну. У Вступі необхідно:

- обґрунтувати актуальність та значущість даної роботи;
- визначити мету і конкретні завдання розрахунку;
- визначити об'єкт і предмет дослідження;
- провести огляд літературних джерел за темою роботи;
- проаналізувати особливості функціонування предмета дослідження;
- сформулювати задачу та вибрати методику проведення розрахунків.

В основній частині необхідно грамотно, стисло, логічно й аргументовано викласти зміст і результати роботи. При цьому слід уникати загальних слів, бездоказових тверджень, тавтології. Використані умовні позначення і одиниці фізичних величин повинні відповідати ЕСКД, ДСП та системі Сі. Необхідно належним чином оформити текстову і графічну частину роботи. Вимоги до побудови, викладання та оформлення роботи повинно відповідати Державному стандарту України ДСТУ 3008-95 "Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення".

В кінці роботи необхідно сформулювати висновки, в яких логічно викласти та проаналізувати одержані результати розрахунку. Необхідно також навести відповідним чином оформлений список використаної літератури, посилання на яку повинно міститися в тексті основної частини.

ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ ДО РОЗРАХУНКОВО - ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

№ п/п		№ п/п		№ п/п	
1	70x40x4, ПС110/10	29	90x50x4, ПС110/10	57	110x85x5, ПС35/10
2	70x45x5, ПС35/10	30	90x55x5, ПС35/10	58	110x90x4, ПС110/10
3	70x50x4, ПС110/10	31	90x60x4, ПС110/10	59	120x70x4, ПС35/10
4	70x55x5, ПС35/10	32	90x65x4, ПС35/10	60	120x75x5, ПС110/10
5	70x60x4, ПС110/10	33	90x70x5, ПС110/10	61	120x60x4, ПС35/10
6	70x65x5, ПС35/10	34	90x75x4, ПС35/10	62	120x65x5, ПС110/10
7	75x40x5, ПС110/10	35	90x80x5, ПС110/10	63	120x80x4, ПС35/10
8	75x45x4, ПС35/10	36	90x85x4, ПС35/10	64	120x80x5, ПС35/10
9	75x50x5, ПС110/10	37	95x60x5, ПС110/10	65	120x85x4, ПС110/10
10	75x55x4, ПС35/10	38	95x65x4, ПС35/10	66	120x90x5, ПС35/10
11	75x60x5, ПС110/10	39	95x70x5, ПС110/10	67	120x95x4, ПС110/10
12	75x65x4, ПС35/10	40	95x75x4, ПС35/10	68	120x100x5, ПС35/10
13	75x60x5, ПС110/10	41	95x80x5, ПС110/10	69	120x60x5, ПС110/10
14	75x55x5, ПС35/10	42	95x55x4, ПС35/10	70	120x65x4, ПС35/10
15	80x60x4, ПС110/10	43	100x90x4, ПС35/10	71	120x50x5, ПС110/10
16	80x65x5, ПС35/10	44	100x85x5, ПС110/10	72	120x55x4, ПС35/10
17	80x40x5, ПС110/10	45	100x60x5, ПС35/10	73	120x70x4, ПС110/10
18	80x45x4, ПС35/10	46	100x65x4, ПС110/10	74	125x75x5, ПС35/10
19	80x50x5, ПС110/10	47	100x70x5, ПС35/10	75	125x80x4, ПС110/10
20	80x55x4, ПС35/10	48	100x75x4, ПС110/10	76	125x85x5, ПС35/10
21	80x60x5, ПС110/10	49	100x90x4, ПС35/10	77	125x60x4, ПС110/10
22	80x70x5, ПС35/10	50	100x50x5, ПС110/10	78	125x65x5, ПС35/10
23	80x75x4, ПС110/10	51	100x55x4, ПС35/10	79	125x50x4, ПС110/10
24	85x65x5, ПС35/10	52	110x60x4, ПС110/10	80	125x55x5, ПС35/10
25	85x70x4, ПС110/10	53	110x65x5, ПС35/10	81	125x40x4, ПС35/10
26	85x75x4, ПС35/10	54	110x70x4, ПС110/10	82	125x45x5, ПС35/10
27	85x80x4, ПС110/10	55	110x75x5, ПС35/10	83	130x30x5, ПС110/10
28	85x80x5, ПС35/10	56	110x80x4, ПС110/10	84	155x90x4, ПС35/10

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Базуткин В. В., Ларионов В.П. «Техника высоких напряжений», М.: Энергоатомиздат.- 1998.- 483 с.
2. Бібіков М. О., Комаров Н. С., Сергеев О. С. «Техніка високих напруг», К.: Вища школа.- 2002.- 375 с.
3. Найфельд М. Р. «Заземлення та інші захисні міри», М.: Энергия.- 1975.- 347 с.
4. Ларіонов В. П. «Защита жилых домов и промышленных зданий от молнии», М.: Энергоатомиздат.- 1974.- 234 с.
5. Техніка високих напруг /Під ред. Г. С. Кубинського. СПб.: Энергомашздат.- 2003.- 256 с.
6. Неклепаев Б. Н., Крючков И. П. Электрическая часть станций и подстанций. М.: Энергоатомиздат.- 1995.- 463 с.
7. Рой В. Ф. Конспект лекцій з курсу «Техніка та електрофізика високої напруги». Х., ХНАМГ.- 2009.- 172 с.
8. Горелов С. В., Татьянченко Л. Н. Изоляция и перенапряжения в системах электроснабжения . Барнаул. -изд-во Алт. ГТУ.- 2002.- 425 с.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Методичні вказівки
до розрахунково-графічної роботи
з курсів

**«ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ»
та
«ТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА ВИСОКОЇ НАПРУГИ»**

(для студентів 4-5 курсів заочної форми навчання
за напрямом підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології»
та слухачів другої вищої освіти зі спеціальності 7.090603 (7.05070103)
«Електротехнічні системи електроспоживання»)

Укладач: **РОЙ Віктор Федорович**

Редактор: *З. І. Зайцева*

Комп'ютерне верстання: *І. В. Волосожарова*

План 2011, поз. 250 М

Підп. до друку 21.01.2011 р.	Формат 60x84/16
Друк на ризографі.	Ум.-друк. арк. 1,6
Зам. №	Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач
Харківська національна академія міського господарства
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 4064 від 12.05.2011 р.